

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Мартиненка Геннадія Юрійовича

«Динаміка роторів турбомашин

в пасивних і активних магнітних підшипниках»

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Актуальність теми дисертаційної роботи. При проектуванні сучасних високотехнологічних об'єктів машинобудування, особливо енергетичного, є їх надійне та безперебійне функціонування в широкому спектрі умов експлуатації. Виконання цієї умови досягається при забезпеченні динамічної стійкості найбільш високо навантажених їх вузлів, до яких відносяться роторні системи. Динаміка роторів завжди була одним з актуальних напрямків як розрахункових, так і експериментальних напрямків досліджень великої плеяди вчених в галузі теорії коливань механічних систем. Їх результати знайшли широке відображення в численних публікаціях. Однак такі дослідження в основному були зосереджені на вивченні динамічного стану роторів в класичних опорах. Останнім часом прогресивним напрямком при проектуванні роторних машин є використання магнітних підшипників, як особливого типу пружно – демпферних опор. Це викликає необхідність розробки нових підходів до математичного моделювання таких систем методів дослідження їх динамічного стану та визначення закономірностей формування його характеристик з урахуванням особливостей впливу фізичних процесів, властивих для магнітних підшипників. Можна однозначно констатувати, що розвиток цього наукового напрямку викликає зацікавленість багатьох вчених. Формується навіть особливий науковий напрямок в галузі динаміки і міцності машин, який можна назвати як магніто динаміка роторних систем. Однак аналіз існуючих результатів досліджень свідчить, що розроблені математичні моделі носять спрощений характер, в першу чергу врахуванням магнітних сил. Крім того, відсутній комплексний підхід до вирішення такої важливої наукової проблеми.

Викладене вище, а також результати аналізу науково-технічної літератури у вказаному науковому напрямку вказують на необхідність подальшого розвитку теорії динаміки роторів в магнітних підшипниках. З цієї точки зору, актуальність теми представленої дисертаційної роботи, яка полягає в розробці аналітичної теорії динаміки роторів в магнітних підшипниках, як пасивних, так і активних, з урахуванням нелінійного характеру зв'язків між електричними, магнітними та механічними процесами, які характерні для експлуатації таких систем; створенні методологічного апарату аналізу та проведенні комплексних розрахунково-експериментальних досліджень з оцінки динамічної поведінки жорстких роторів в магнітних підшипниках, не викликає сумніву.

Зв'язок роботи з пріоритетними науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи в повній мірі відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, затверджених в Україні на законодавчому

рівні. Робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» на кафедрі динаміки та міцності машин у відповідності з планами 6 науково-дослідних робіт МОН України, починаючи з 2000 року, а також в рамках договорів на створення науково-технічної продукції з ПАТ «Сумське НВО».

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій роботи полягає в тому, що вони базуються на коректному використанні фундаментальних положень математичної фізики та механіки деформованого твердого тіла, теорій автоматичного управління, стійкості та оптимізації з урахуванням особливостей об'єктів вивчення як магніто динамічних систем. Достовірність та обґрунтованість одержаних результатів проведених розрахункових досліджень підтверджується їх добрим узгодженням з відомими теоретичними висновками та даними експериментальних випробувань і експлуатації.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає в розробці теоретичних основ динаміки роторів в магнітних підшипниках різних типів (активних і пасивних) на основі запропонованої загальної концепції її математичного опису та науково - обґрунтованих і експериментально підтверджених математичних моделей таких роторів як магнітодинамічних нелінійних систем, що дозволило отримати оптимізовані залежності радіальних і осьових зусиль для серії радіальних пасивних магнітних підшипників різної конфігурації, та виявити і обґрунтувати за допомогою створених нових імітаційних обчислювальних моделей особливості динамічної поведінки реальних роторних систем з магнітними підшипниками, саме наявність зворотної прецесії і роздвоєння резонансів при використанні пасивних магнітних підшипників, можливість проявів суб-, супер- і внутрішніх резонансів та інше, що знайшло експериментальне підтвердження, зокрема такі як взаємопов'язаність радіальних і осьових коливань і резонансних режимів, а також вплив магнітної незрівноваженості, викликаної технологічними і експлуатаційними недосконаlostями, на стійкість руху роторів. На основі роторів в магнітних підшипниках різних типів (пасивних і активних) з урахуванням взаємозв'язку механічних, електричних і магнітних процесів, що відбуваються в системі, виявлено нові явища. Розроблено та експериментально підтверджено спосіб проходження резонансних режимів (критичних швидкостей) обертових роторів в комбінованих пасивно-активних магнітних підвісах, заснований на можливості зміни механічної жорсткості і дисипації, розроблено та експериментально підтверджено спосіб проходження резонансних режимів (критичних швидкостей) роторів в комбінованих пасивно-активних магнітних підвісах, заснований на можливості зміни механічної жорсткості і демпфуючих властивостей магнітних підшипників.

Практичне значення одержаних наукових результатів в першу чергу полягає в тому, що з використанням розроблених автором теоретичних основ динаміки роторів на магнітних підшипниках різних типів дозволяє підвищити

достовірність розрахункового визначення параметрів таких роторів, знизити витрати на проведення проектно-конструкторських робіт та в експлуатації. Важливе прикладне значення має доведена можливість установки пасивних магнітних підшипників спільно з активними магнітними підшипниками для реалізації комбінованого магнітного підвісу роторів промислових турбомашин із забезпеченням необхідного діапазону стійкості руху. Про практичну значимість результатів роботи також свідчить запатентований та впроваджений спосіб дискретного управління електромагнітним підвісом роторів, тобто управління активними магнітними підшипниками, що сприяє підвищенню швидкодії і розширення діапазону стійкості системи, та створений новий вид пасивних магнітних підшипників із змінною жорсткістю, виконаних з використанням кільцевих постійних магнітів з обмоткою підмагнічування. Слід також відзначити використання результатів роботи в навчальному процесі, що сприяє підвищенню рівня підготовки інженерних та наукових кадрів.

Оцінка структури, обсягу та змісту роботи. Дисертаційна робота складається із анотацій, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи – 601 стор. Рукопис роботи включає 273 рисунка, з яких 206 – в тексті, а 67 – на окремих сторінках, та 32 таблиці. Список використаних джерел складається із 489 найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та вказано на її зв'язок з науковими програмами, планами та темами, сформульовані мета і задачі дослідження, визначені наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, наведені дані про особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації.

Перший розділ роботи присвячено огляду відомих результатів досліджень вітчизняних та закордонних вчених з вивчення динаміки роторних систем. Автор детально зупинився на розгляді об'єктів вивчення, аналізі існуючих методів та відомих результатах досліджень динамічних явищ роторів з урахуванням традиційних і магнітних підшипників. Проведено аналіз причин збудження коливань таких систем та способів їх ідентифікації. Слід відзначити всебічність проведеного огляду публікацій за темою роботи, про що свідчить їх бібліографічний список. Враховуючи постановку задачі, велику увагу приділено магнітним підшипникам та моделюванню динаміки роторів з такими опорами. Показано, що існуючі розрахункові моделі базуються на лінеаризації визначальних рівнянь, що суттєво обмежує їх використання. Саме це дозволило автору сформулювати основну мету роботи та напрямки її досягнення.

У другому розділі дисертації автор детально зупинився на висвітленні результатів вирішення задачі моделювання роторів на магнітних підшипниках різних типів, а саме:

- способу математичного опису динаміки роторів, які обертаються в повних магнітних підвісах з урахуванням нелінійного взаємозв'язку між механічними, магнітними та електричними процесами;
- аналітичного способу знаходження магнітної енергії і сил в активних магнітних підшипниках, який базується на побудові еквівалентних схем замі-

щення і застосуванні методу контурних потоків для аналізу магнітних кіл підшипників, що дає можливість врахування потоків розсіювання і магнітних опорів ділянок магніто проводів;

- залежностей електромагнітних сил з використанням розроблених скінченноелементних методик визначення параметрів силових і жорсткісних характеристик, як необхідної умови для розв'язку системи нелінійних диференціальних рівнянь, які описують коливання ротора з вибраним типом підшипників;

- розрахункових засобів знаходження силових характеристик магнітних підшипників вибраного типу, як необхідної умови автоматизації проведення чисельних розрахунків динамічних характеристик роторів;

- імітаційної обчислювальної моделі динаміки роторів в пасивних та/або активних магнітних підшипниках, яка забезпечує проведення уточненого аналізу з урахуванням можливих нелінійностей системи.

Особливо слід відзначити те, що автор не обмежується викладом результатів власних розробок, а паралельно вказує на їх переваги в порівнянні з існуючими в практиці вирішення задач динаміки роторів.

Питанням експериментальної реалізації систем управління і контролю динамічних характеристик роторних систем з магнітними підшипниками присвячено **третій розділ роботи**. Важливість їх розгляду пояснюється необхідністю верифікації розробленого математичного апарату вивчення динаміки роторів в магнітних підшипниках. Для цього автором розроблено комплекс експериментальних засобів, пріоритетність окремих з яких підтверджена патентами. До таких науково-технічних продуктів слід віднести:

- спосіб дискретного управління активними магнітними підшипниками;
- систему автоматичного управління осьовим упорним активним магнітним підшипником;
- лабораторну установку за схемою повного магнітного підвісу горизонтального ротора комбінованого магнітно-електромагнітного типу;
- програмно-апаратний комплекс для експериментальних досліджень вібраційних характеристик роторів в магнітних підшипниках і вивчення різних явищ роторної динаміки в системах з магнітними підшипниками різних типів, а також ідентифікації явищ, пов'язаних із застосуванням магнітних підшипників.

У четвертому розділі наведено результати проведеного комплексу розрахунково-експериментальних досліджень, в рамках яких було визначено характеристики динаміки модельних роторів в магнітних підшипниках, які підтверджують справедливості запропонованих вище теоретичних і практичних підходів до визначення силових характеристик магнітних підшипників різних типів і фактично будь-якої конструктивної конфігурації; пошуку аналітичних виразів, що описують стан активних магнітних підшипників; формування і розв'язування нелінійних систем диференціальних рівнянь, що описують динаміку об'єктів вивчення та моделювання виникаючих при цьому лінійних і нелінійних явищ.

П'ятий розділ роботи присвячено висвітленню результатів експериментально-розрахункових досліджень характеристик динаміка роторів енергетичних турбомашин з магнітними підшипниками з використанням розроблених

математичних моделей, способів, методик, алгоритмів і розрахункових засобів. Зокрема, слід відзначити розробку і створення магнітних опор роторів детандер-компресорного агрегату для виробництва зрідженого природного газу, які забезпечують необхідні жорсткісні характеристики і необхідні динамічні параметри до робочих частот обертання. Наведені приклади вирішення інших практичних задач.

Публікації та оприлюднення результатів. За результатами проведених комплексних досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковано 90 наукових праць, з яких 52 – одноосібні. В провідних спеціалізованих фахових виданнях, затверджених МОН України, та виданнях інших держав опубліковано 45 робіт, з яких 21 – в журналах і 24 – в збірниках наукових праць. Серед цих праць 9 публікацій у виданнях іноземних держав або у виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз.

Матеріали роботи широко апробовані на численних міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах, зокрема і закордоном, що свідчить про ознайомлення з ними широкої наукової громадськості.

Основні зауваження по роботі.

1. В роботі чітко відзначається, що магнітні підшипники слід розглядати як пружно – демпферні опори роторів. Але питання демпфірування коливань роторів за рахунок дисипативних властивостей таких підшипників не знайшло достатнього відображення.

2. В другому розділі при формуванні системи диференціальних нелінійних рівнянь руху запропоновано розкладання тригонометричних функцій в степеневі ряди з утриманням в рівняннях руху членів першого, другого і третього порядків відносно узагальнених координат, а також їх перших і других похідних за часом. Але не зрозуміло чи проводилась оцінка похибки, яка вноситься в математичну модель при відкиданні доданків вище третього порядку відносно узагальнених координат та їх похідних.

3. Важливою складовою роботи є взаємозв'язок магнітних параметрів підшипників та динамічних характеристик роторів. Але в роботі не приділено достатньої уваги представленню закономірностей такого взаємозв'язку, що має важливе прикладне значення з точки зору оптимізації як самої системи, так умов її експлуатації.

4. Автором розроблено ряд методик чисельного визначення характеристик магнітних підшипників. Однак бажано було б чітко описати процедуру їх практичного використання.

5. Для ротора детандер-компресорного агрегату запропоновано комбінований пасивно-активний магнітний підвіс з двома радіальними пасивними і одним осьовим активним магнітними підшипниками, та якщо для радіальних пасивних надано докладну інформацію щодо їх розробки, характеристик та параметрів, то для осьового активного підшипника відомості носять загальний характер і не зрозуміло, чи це власна розробка, та який алгоритм управління застосовується в ньому для забезпечення необхідних характеристик.

6. На жаль, автору не вдалося уникнути в тексті окремих редакційних неузгодженостей вірогідно, що це пояснюється його намаганням втиснути той величезний обсяг виконаних експериментально-розрахункових досліджень в одну роботу. В тексті автореферату зустрічаються русизми, дуже багато введено аббревіатур, що ускладнює сприйняття матеріалу.

Загальний висновок

Результати всебічного розгляду та аналізу дисертаційної роботи «Динаміка роторів турбомашин в пасивних і активних магнітних підшипниках» дозволяють зробити однозначний висновок, що вона є завершеним науковим дослідженням, яке виконане на актуальну тему і високому науковому рівні та відповідає сучасним вимогам до проведення наукових досліджень. Значимість роботи для науки полягає у вирішенні важливої науково-технічної проблеми в галузі динаміки та міцності машин щодо розробки теоретичних основ динамічної поведінки роторів в системах з магнітними підшипниками різних типів.

Зазначені вище зауваження слід розглядати як побажання для подальшого наукового пошуку і не знижують загальної позитивної оцінки роботи.

Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи, оформлення дисертації і автореферату в цілому задовольняє нормативним вимогам, які діють в Україні.

Результати дисертаційної роботи рекомендується використовувати в проектно-конструкторських, науково-дослідних і виробничих організаціях машинобудівного та транспортного спрямування. Крім того, матеріали дисертації можуть знайти застосування у навчальному процесі в технічних університетах України при підготовці фахівців за інженерними спеціальностями енергетичного, машинобудівного та транспортного профілю.

Робота задовольняє вимогам, поставленим до докторських дисертацій п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Мартиненко Геннадій Юрійович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент

Заст. директора Інституту проблем
міцності імені Г.С.Писаренка
НАН України з наукової роботи,
завідувач відділу коливань та
вібраційної надійності
доктор технічних наук, професор



А.П. Зінковський

